

Febrero 2011

Arts et Métiers ParisTech

Paris

# Caracterización mecánica de la matriz de composites de tipo BMC

RODRIGUEZ GUTIÉRREZ, Eugenio

FITOUSSI Joseph

BOCQUET Michel

LE THI TUYET Nhung

AÑO: 2011

CENTRO DE REALIZACIÓN: ENSAM Paris

AUTOR: Eugenio RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ

TÍTULO: Caracterización mecánica de la matriz de composites de tipo BMC

TUTOR EN EL CENTRO DE REALIZACIÓN: Joseph Fitoussi

EMPRESA COLABORADORA: Schneider Electric – Grenoble - France

NÚMERO DE PÁGINAS: 44

NÚMERO DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS: 5

COORDINADOR ACADÉMICO DEL CONVENIO: Ángel Arias Hernández

COTUTOR: Ángel Arias Hernández

CALIFICACIÓN: 16/20

**RESUMEN:** En Schneider, el composite BMC se utiliza principalmente para fabricar contadores eléctricos. El material composite BMC está formado por varios constituyentes. Los principales elementos son partículas de ATH (Alúmina Tri Hidratada: en torno al 40% en masa), fibras de vidrio cortas (en torno al 20% en masa) y una resina de poliéster insaturado. Con el fin de comprender bien el papel de la resina, se han estudiado diferentes resinas con diferentes formulación de cargas y se ha intentado establecer la relación entre formulación-microestructura-comportamiento mecánico.

**PALABRAS CLAVE:** MATERIALES COMPOSITE – MATERIALES POLIMÉRICOS – BMC – COMPORTAMIENTO MECÁNICO – NÓDULOS TERMOPLÁSTICOS – ENSAYOS DE TRACCIÓN ESTÁTICA – SIMULACIÓN NUMÉRICA

## Índice :

1. Introducción.....	4
2. El objetivo del estudio.....	4
3. Expérimental.....	5
3.1. Ensayos de tracción estática.....	5
3.2. Observación con MEB.....	5
3.3. Relación Micro-Macro.....	7
4. Simulaciones.....	8
4.1 Búsqueda de la ley de Ramberg-Osgood.....	8
4.2. Simulaciones numéricas .....	9
5. Conclusiones.....	10
6. Bibliografía.....	10

## 1. Introducción

El BMC (Bulk Molding Compound) tiene la principal ventaja de no ser conductor. Sin embargo, cuando es sometido a un arco eléctrico, sufre fuertes tensiones termo-mecánicas (ley de los gases en termodinámica), por lo que es indispensable conocer el comportamiento mecánico incluso para utilizaciones *a priori* eléctricas.

Las piezas realizadas en BMC son inyectadas, la microestructura del material es muy heterogénea (resina de polímero termoendurecible, fibras de vidrio, carbonato de calcio, etc) y las propiedades mecánicas son en consecuencia muy dispersas.

Una química elaborada caracteriza los composites a base de poliéster insaturado UP. El BMC es un sistema complejo que comprende en realidad poco de matriz termoendurecible. Ésta tiene el papel de ligante y contribuye en la distribución de los esfuerzos en el composite.

Así, en los BMC se pueden encontrar diferentes adyuvantes que son incorporados a la resina de poliéster para aportar características particulares:

- Las cargas: cargas de alúmina en nuestro estudio.
- Los refuerzos: tienen por objetivo aumentar las características mecánicas del material final.
- Los agentes anti-contracción: la compensación de la contracción de consigue añadiendo material termoplástico en la formulación que forma nódulos.
- Los agentes anti-UV.
- Los agentes thixótropos: agentes cuya función es dar a la composición un carácter thixótropo (es decir, que la viscosidad disminuye con la tasa de cizalladura).

Los componentes minerales representan entre el 60 y el 80% en masa del material. El conjunto de los constituyentes, excepto el refuerzo, constituye la « pasta ». Cada formulación de componente se acompaña de un valor de contracción que le es propio. El agente termoplástico tiene por función distribuir la contracción en el seno del material [1].

## 2. El objetivo del estudio

El proceso de fabricación de un material le confiere una microestructura, y esta microestructura engendra unas propiedades particulares del material final. Es esta relación entre la microestructura de las resinas BMC y sus propiedades la que se ha intentado establecer en este estudio. Estudios anteriores han permitido poner en evidencia el papel importante de los nódulos de termoplástico en los primeros estados de carga, principalmente con la presencia de deformaciones residuales y de un comportamiento no lineal desde bajos niveles de carga. Es este papel el que se va a estudiar, partiendo de una hipótesis: la no linealidad del comportamiento mecánico de las resinas BMC proviene de la deformación de las cavidades dejadas por la disolución de los nódulos termoplásticos que aparecen en su microestructura durante el proceso de fabricación. Para demostrar esta hipótesis, se han desarrollado dos tipos de trabajo sobre 3 formulaciones de resina diferentes: trabajo experimental y trabajo de simulación. La diferencia entre las formulaciones es la

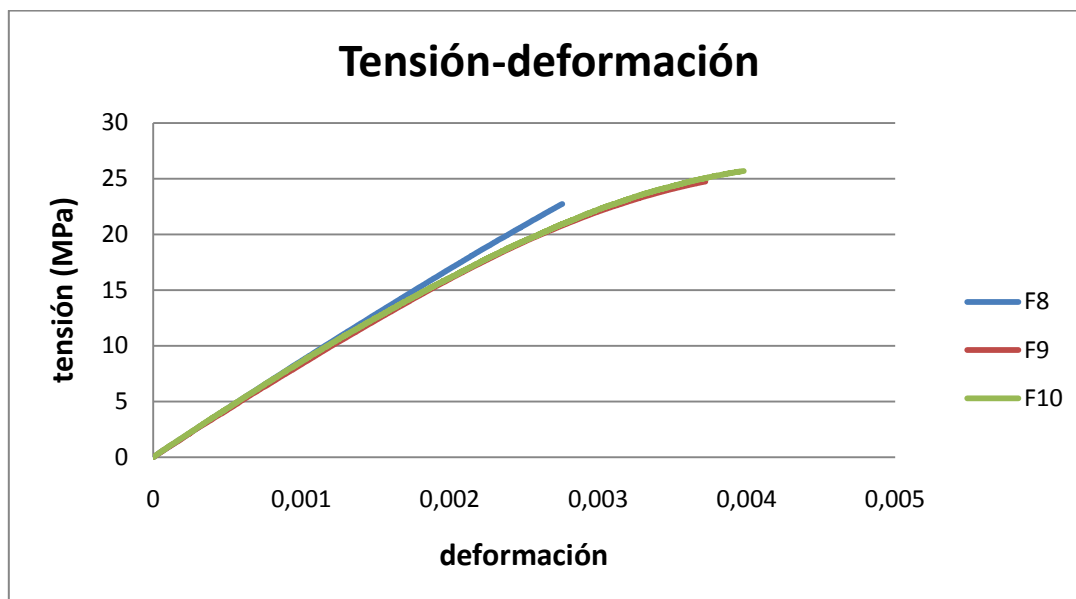
granulometría de las cargas de alúmina: más pequeña (ATH OL 107) en la formulación F8, más grande (ATH ON 313) en la formulación F9, y una mezcla de las dos en la F10.

### 3. Experimental

El trabajo experimental ha consistido en una serie de ensayos de tracción estática y de observaciones con el Microscopio Electrónico de Barrido (M.E.B.).

#### 3.1 Ensayos de tracción estática

En la *Figura 1*, se pueden comparar las curvas tensión-deformación de las diferentes resinas.



*Figura 1.- Curvas tensión-deformación para las diferentes resinas.*

La *Tabla 1* muestra las características mecánicas de las diferentes resinas.

	E (MPa)	$\sigma_{0Y}$ (MPa)	$\epsilon_{0Y}$ (%)	$\sigma_{rupt}$ (MPa)	$\epsilon_{rupt}$ (%)
F8	8819,5 $\pm$ 200,1	15,534 $\pm$ 1,762	0,180 $\pm$ 0,021	23,723 $\pm$ 1,238	0,2863 $\pm$ 0,0205
F9	8367,3 $\pm$ 383,7	14,003 $\pm$ 0,734	0,1713 $\pm$ 0,0163	24,019 $\pm$ 2,060	0,3460 $\pm$ 0,0353
F10	8666,7 $\pm$ 727,6	13,799 $\pm$ 1,304	0,1626 $\pm$ 0,0112	23,126 $\pm$ 2,242	0,3320 $\pm$ 0,0773

*Tabla 1.- Caractéristiques mécaniques des différentes résines.*

Se puede comprobar que las partes elásticas de las resinas (módulo de Young, límite elástico y deformación en el límite elástico) son muy parecidas. En cambio, es en las partes plásticas donde se puede apreciar diferencias notables.

Los comportamientos plásticos de las resinas F9 y F10 son muy similares. Éste debe ser debido al hecho de que la granulometría de las cargas de alúmina es mayor (ATH ON 313) y en consecuencia éstas pueden ser responsables de nódulos termoplásticos más grandes, como veremos más adelante.

#### 3.2 Observación con M.E.B.

La microestructura de este tipo de materiales está ligada a los mecanismos de cambio de fase y a la compensación de la contracción. Así, hay zonas de formas redondeadas correspondientes a la fase termoplástica. Además, aparece una fase intermedia entre la matriz termoendurecible y la fase termoplástica [2].

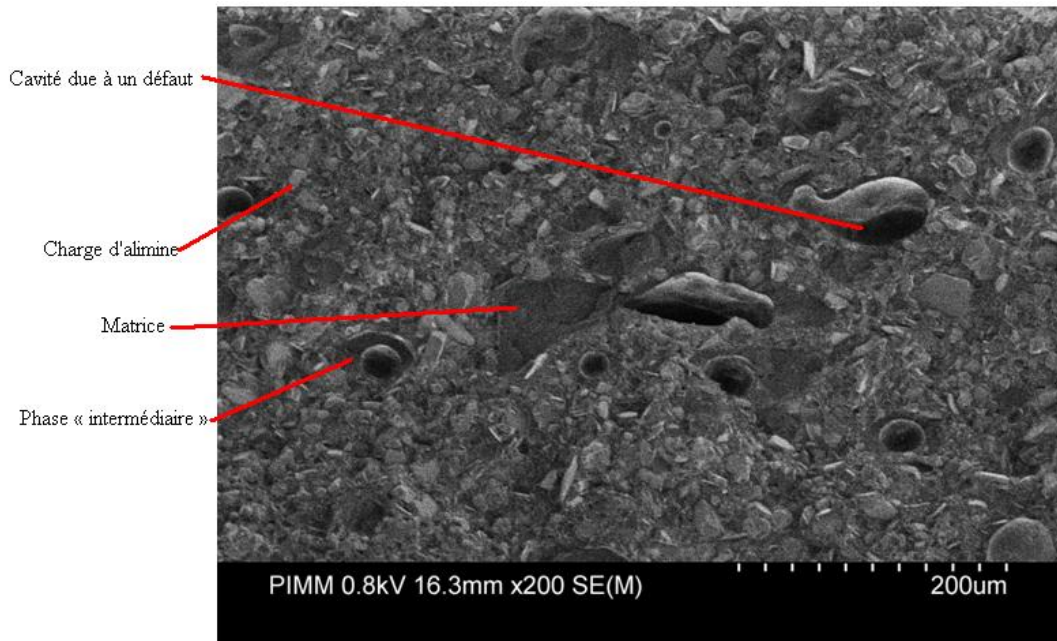


Figura 2.- Diferentes zonas en la microestructura de un material BMC (resina F10).

Las microestructuras de las resina F9 y F10 son muy parecidas, se pueden observar los mismos componentes en las dos formulaciones. Incluso el tamaño de los microvacíos y de las fases intermedias son parecidos. En cambio, la microestructura de la resina F8 es muy diferente de las de las otras resinas. El tamaño de la porosidad es más pequeño y homogéneo. También se pueden distinguir fisuras debidas quizás a la coalescencia de microvacíos [3].

Podemos concluir que son las cargas de alúmina más grandes (ATH ON 313) las que producen un tamaño de porosidad más grande. En cambio, parece que estas cargas evitan la aparición de fisuras por coalescencia de microvacíos. Pero en estas resinas las cargas no están muy bien distribuidas y se pueden distinguir grandes zonas de matriz sin carga.

También se pueden distinguir las cavidades dejadas por la disolución de los nódulos termoplásticos, que han sido deformadas por la tensión aplicada [2].

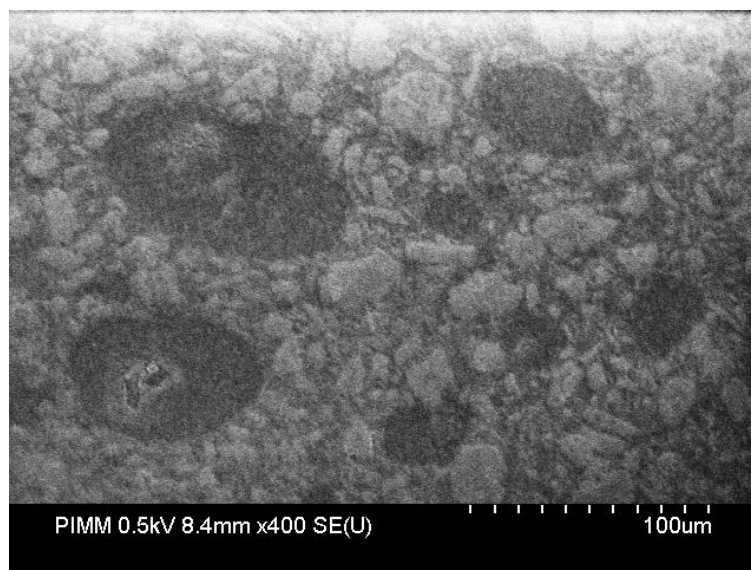


Figura 3.- Nódulos termoplásticos en la resina F10 (después de pulido).



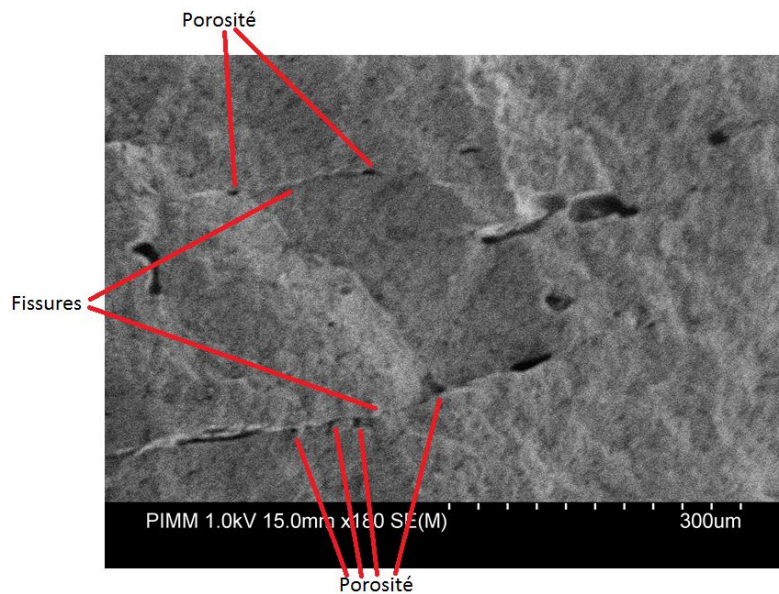


Figura 4.- Fisuras causadas por coalescencia de microvacíos en la resina F8.

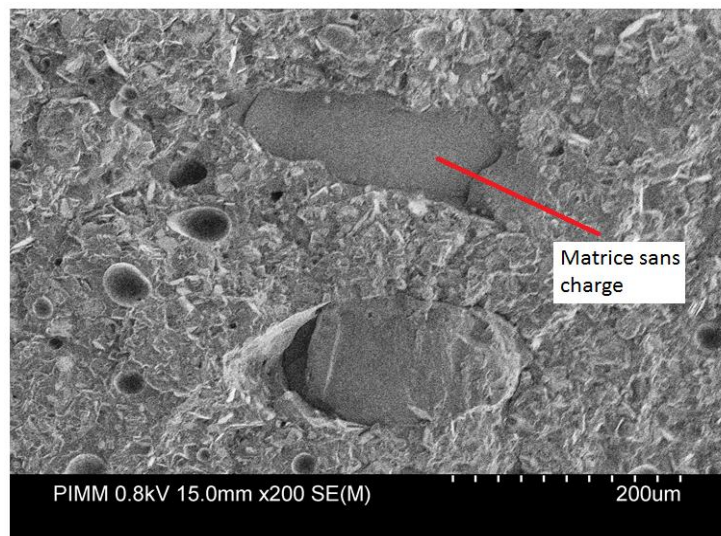


Figura 5.- Matriz sin carga en la resina F9.

	F8	F9	F10
número de nódulos	39	29	37
tamaño medio de los nódulos (um)	2,32	29,64	30

Tabla 2.- Número y tamaño medio de los nódulos termoplásticos de las diferentes resinas.

Como ya habíamos observado, el tamaño de la porosidad y de los nódulos termoplásticos de las resinas F9 y F10 es idéntico, lo que nos hace pensar que son las cargas de alúmina de mayor granulometría las que tienen un efecto mayor en la microestructura del material y en el tamaño de los nódulos termoplásticos.

### 3.3 Relación Micro-Macro

Hemos visto que con las cargas de alúmina más grandes se obtienen nódulos termoplásticos más grandes y un comportamiento menos frágil del material. Podemos considerar que existe una relación entre estos dos efectos. Cuando se aplica una tensión al material, los nódulos termoplásticos

absorben una parte de esta tensión y la utilizan para deformarse. Así, el comportamiento es menos frágil y más plástico hasta la rotura. Podemos considerar como válida la hipótesis de partida: la no linealidad del comportamiento mecánico de las resinas BMC proviene de la deformación de las cavidades dejadas por la disolución de los nódulos termoplásticos que aparecen en su microestructura durante el proceso de fabricación.

## 4. Simulaciones

### 4.1 Búsqueda de la Ley de Ramberg-Osgood

Se han realizado simulaciones numéricas de ensayos de tracción utilizando el software de cálculo por elementos finitos Abaqus a fin de obtener una ley de comportamiento elasto-plástico de tipo Ramberg-Osgood. Aproximadamente 400 elementos finitos se han tenido en cuenta [4].

Se han considerado ensayos de tracción con probetas rectas (sin entalla) para identificar los parámetros elasto-plásticos de la resina F10. Se han utilizado como datos de partida un módulo de Young  $E = 8488,4$  MPa y un coeficiente de Poisson  $\nu = 0,27$ . La aparición del campo de dominio plástico se ha tomado como  $\sigma_{0Y}$  ( $= 12,576$  MPa). Se ha elegido una Ley de Ramberg-Osgood para simular el comportamiento elasto-plástico, teniendo la siguiente forma [5]:

$$\sigma = \sigma_{0Y} + K_Y * \varepsilon_{plast}^{1/M_Y} \quad (2)$$

donde:

$\sigma_{0Y}$  tensión en el límite elástico

$K_Y$  coeficiente de resistencia plástica

$M_Y$  exponente de endurecimiento.

Para estimar los parámetros  $K_Y$  et  $1/M_Y$ , se han aplicado logaritmos neperianos a los dos miembros de la ecuación, obteniendo:

$$\ln(\sigma - \sigma_{0Y}) = \ln(K_Y) + \frac{1}{M_Y} \ln(\varepsilon_{plast})$$

Esta ecuación corresponde a la ecuación de una recta con una pendiente  $1/M_Y$  y una ordenada en el origen  $\ln(K_Y)$ .

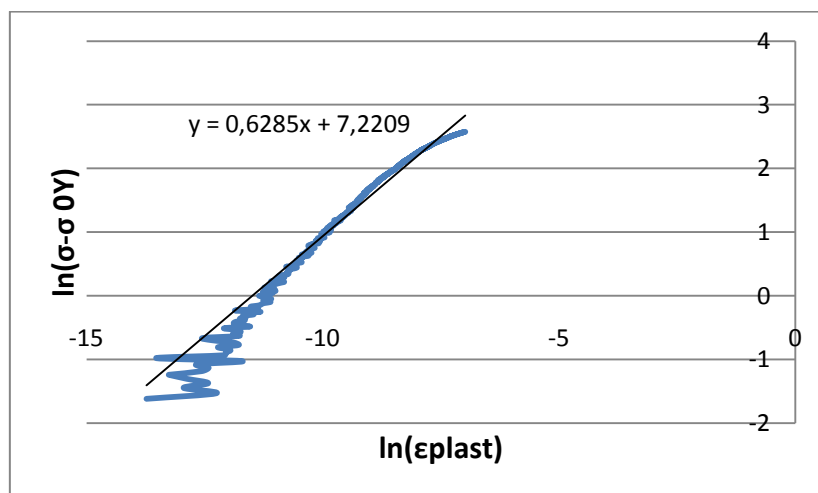


Figura 6.- Gráfico  $(\ln(\sigma - \sigma_{0Y}), \ln(\varepsilon_{plast}))$



Así, los parámetros buscados son:

$$\ln(K_Y) = 7,2209 \rightarrow K_Y = 1367,72$$

$$1/M_Y = 0,6285$$

#### 4.2 Simulations numériques

Una vez elegidos los parámetros de la ley de Ramberg-Osgood, se ha comprobado su validez utilizando el software Abaqus. Tras numerosas simulaciones (*Figura 7*) se han elegido los siguientes parámetros (*Figura 8*):

$$K_Y = 900$$

$$1/M_Y = 0,61$$

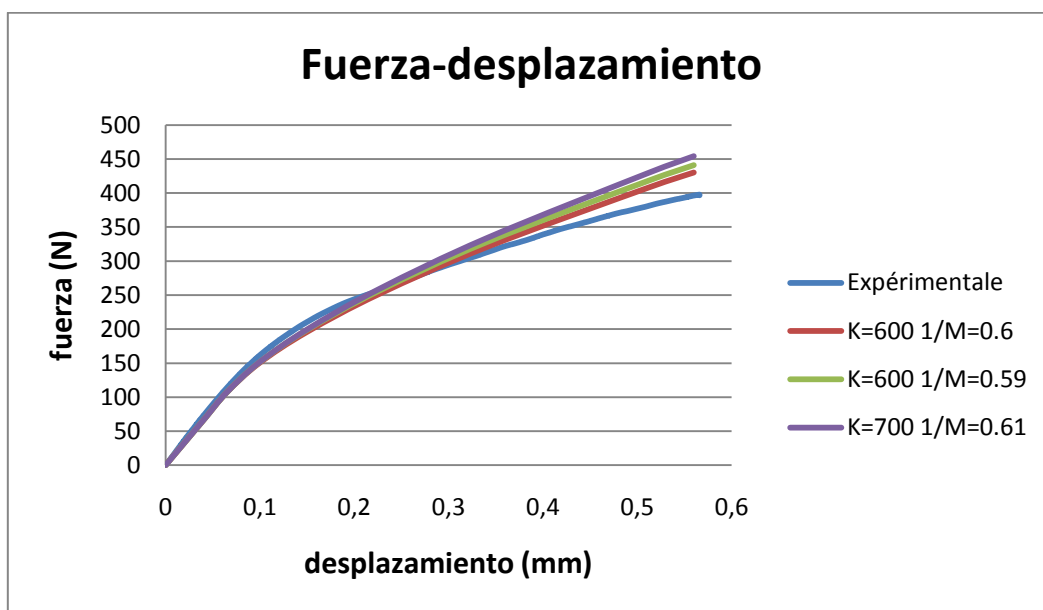


Figura 7.- Resultados de algunas simulaciones con Abaqus.

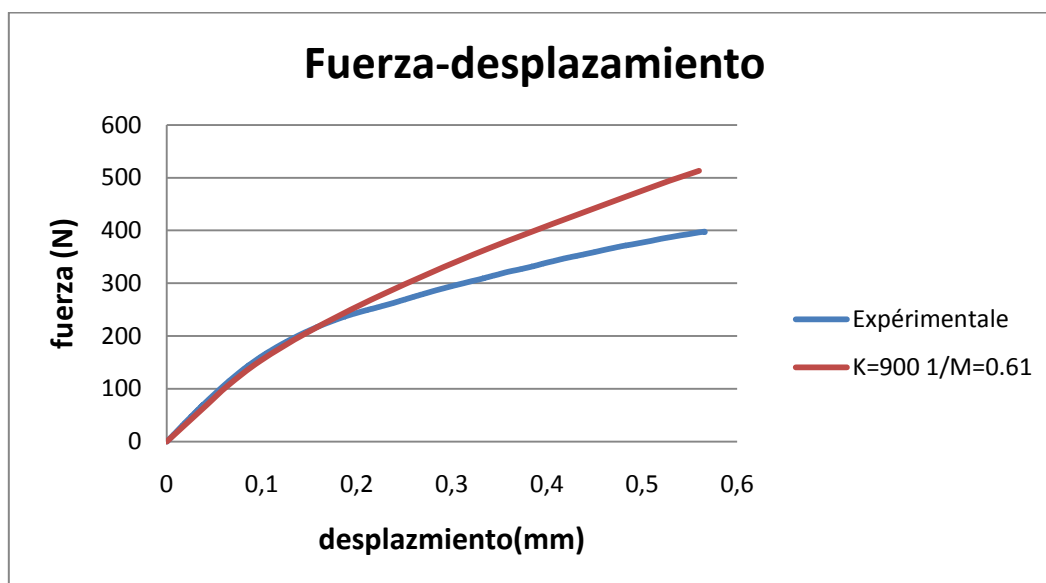


Figura 8.- Ley de Ramberg-Osgood elegida.

## 5. Conclusiones

Los trabajos llevados a cabo en este estudio han tenido como objetivo comprender el papel de la resina (matriz y cargas de alúmina) en el comportamiento mecánico del composite BMC.

Se ha partido de una hipótesis: la no linealidad del comportamiento de las resinas BMC proviene de la deformación de las cavidades dejadas por la disolución de los nódulos termoplásticos que aparecen en su microestructura durante el proceso de fabricación.

A partir de ensayos de tracción y de observaciones con microscopio electrónico de barrido, se ha podido validar esta hipótesis.

También se ha podido constatar la influencia de las cargas de alúmina en la microestructura y el comportamiento mecánico de las resinas. Un tamaño más pequeño de carga (en términos de su granulometría) proporciona una microestructura con una porosidad muy pequeña y un comportamiento mecánico más frágil. Un tamaño de carga más grande proporciona una porosidad más grande y una fase intermedia más espesa alrededor de las cavidades dejadas por la disolución de los nódulos termoplásticos. El efecto es un comportamiento menos frágil gracias a la deformación de las cavidades por la tensión y una inhibición de la aparición de fisuras.

Finalmente, se ha conseguido encontrar una primera aproximación de la ley de comportamiento plástico de tipo Ramberg-Osgood para la resina F10.

## 6. Bibliografía

[1] LE THI TUYET NHUNG, *Loi de comportement des composites BMC. Rapport de 1<sup>ère</sup> année*. Arts et Métiers ParisTech, Centre de Paris. Dossier n° 65037. 2008.

[2] SYLVIE TEYSSIER, *Analyse globale de l'orientation dans un BMC et relation avec les propriétés mécanique. Rapport de Thèse*. Université de Savoie, LMOPS, UMR CNRS 5041. 2002.

[3] SUN JUN, *Effect of stress triaxiality on micro-mechanisms of void coalescence and micro-fracture ductility of materials*. Engineering Fracture Mechanics, vol. 39, n° 5, 1991 pp. 799-805.

[4] MICHAEL BRÜNING, OLIVER CHYRA, DANIEL ALBRECHT, LARISSA DRIEMEIER, MARCÍLIO ALVES, *A ductile damage criterion at various stress triaxialities*. International Journal of Plasticity, n° 24, 2008 pp. 1731-1755.

[5] JEAN LEMAITRE, JEAN-LOUIS CHABOCHE, *Mécanique des matériaux solides*. Ed. Dunod, Paris. 2004.